

氏 名	谷 川 伸
生 年 月 日	
本 籍	愛知県
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第259号
学位授与の日付	平成10年3月25日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	コンクリート中の鉄筋腐食防止対策に関する基礎研究
論文審査委員	（主査）川村 満紀 （副査）石田 啓，中本 義章，鳥居 和之，大城 武

学位論文要旨

The chloride ions are the major cause of corrosion of reinforcement steel in concrete. Concrete structures are contaminated with Cl^- ions due to the use of dredged sea sand at mixing stage and affected by the penetration of the ions from marine environments afterwards. The effectiveness of sodium and calcium nitrite as corrosion inhibitors has been confirmed by clarifying the behavior of Cl^- , OH^- and NO_2^- ions in the pore solution assuming Cl^- ions are introduced at the mixing stage. The accelerated and natural exposure tests showed that the penetration of Cl^- ions into concrete is very rapid, and the corrosion occurs in early stages. When concrete were contaminated with chloride ions, the corrosion rate became proportional to the amount of chloride ions in concrete. The diffusion resistance for the aggressive agents such as chloride ions, water and oxygen, and crack bridging ability for four different surface coatings for concrete were evaluated. From the experimental results, a highly elastic acrylic rubber coating was chosen for further mechanical, chemical and long-term stability tests. The reinforced concrete structure with and without an acrylic rubber-based surface coating was built for a field test in Okinawa, and exposed to severe marine environment for ten years. The coating was found to act as a complete barrier to the transport of the aggressive agents and prevented the corrosion of the reinforcement steel in concrete with 0.3% of Cl^- ions.

コンクリート中の塩分により引き起こされる鉄筋の腐食は、鉄筋コンクリートの「塩害」として大きな社会問題となっている。多くの鉄筋コンクリート構造物が海岸近くに建設されるようになったこと、また、川砂の枯渇化にともないコンクリート用細骨材として海砂が多く用いられるようになったことがそのおもな原因と考えられている。その腐食防止対策として、かぶりコンクリートの改善（品質と厚さ）、コンクリート用の表面被覆材、樹脂被覆鉄筋および電気防食が実用化されている。しかし、この中で一般的に用いられている表面被覆工についても、各種塩分環境下での鉄筋コンクリートの劣化状況の把握とその状況下での表面被覆材による腐食防止の定量的評価、表面被覆材の特性の明確化および内部塩分を含む場合における表面被覆工の適用に際しての内部塩分の許容量は明確にされていない。本論文は、塩分環境における鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上を目的として、塩

害による鉄筋コンクリートの劣化過程を明らかにするとともに、コンクリートの表面被覆材による劣化防止に関する一連の研究をまとめたものである。

第1章では、海砂を使用したコンクリートの練混ぜ時に混入する内部塩分と塩分環境下で外部から浸透してくる外部塩分によるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する歴史的な背景について述べるとともに、本研究の対象である表面被覆工を適用したコンクリート中の鉄筋の腐食防止に関する従来の研究と本研究の目的について述べた。

第2章では、 Cl^- イオン存在下における鉄筋コンクリート用の防錆剤としての亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) および亜硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO})_2$) の効果を細孔溶液中の各種イオンの挙動に注目して検討した。その結果、防錆剤としては、亜硝酸カルシウムのほうが、亜硝酸ナトリウムより優れていることがわかった。これは、亜硝酸カルシウムが混入されたモルタルでは、鉄筋腐食を引き起こす細孔溶液中の Cl^- イオンを、セメント水和物中に固定化する作用がより高いためである。また、亜硝酸カルシウムの防錆効果を発揮できる Cl^- イオンの限界値は約 0.5% (セメントに対する質量%) であり、その場合の防錆剤の添加量は、1.0%量 (セメントに対する質量%) が必要であることを明らかにした。

第3章では、 Cl^- イオンのコンクリート中への浸透に関し、三種類の促進試験 (①塩水噴霧、②塩水の液滴によるシャワーと高温乾燥の繰り返し、③供試体下部の海水浸漬) と自然塩分環境下への暴露試験 (沖縄海岸) において Cl^- イオンが腐食臨界量に達するまでの期間の比較と Cl^- イオンのコンクリート中への浸透過程を数値解析によって検討した。その結果、 Cl^- イオンのコンクリート中への浸透速度は早く、コンクリートの 3cm 深さで、鉄筋の腐食臨界値 (セメントに対する Cl^- イオン量で 0.4%) に達する期間は、促進試験では約 40 日、海水浸漬試験では約 2.4 年、沖縄海岸暴露試験では約 0.7 年となった (表 1)。自然暴露試験で、表層部 (0~1cm) での臨界塩分量の到達期間が内部より長いのは、表層部での雨水による塩分漏出を考慮に入れていないためであり、雨水の影響がない場合は、到達時間はより早いと考えられる。かぶりコンクリートのみでは塩分浸透を十分に抑制することができず、塩分環境下にあるコンクリート構造物は、塩害対策が必要であることが確認された。さらに、コンクリート中への塩分浸透過程をフィックの拡散方程式を差分法で解析する手法を提案した。

表 1 腐食の臨界塩分量に達する期間 (セメント質量に対する Cl^- イオン臨界量 : 0.4%)

		コンクリート表面からの深さ (cm)						
		0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7
促進試験	① 塩水噴霧	40 日	55 日	—	—	—	—	—
	② 塩水シャワー/高温乾燥	12 日	27 日	43 日	61 日	86 日	200 日	300 日
	③ 海水浸漬	1.9 年	2.0 年	2.4 年	3.6 年	5.1 年	6.4 年	8.8 年
自然暴露	沖縄海岸の海側面	1.3 年	0.9 年	0.7 年	0.9 年	1.2 年	2.7 年	5.6 年
	沖縄海岸の陸側面	3.9 年	4.3 年	2.0 年	2.1 年	3.6 年	4.3 年	10.8 年

第4章では、表面被覆材を塗布したコンクリート中の鉄筋腐食防止特性を、飛沫部を想定した塩水噴霧試験および干満部を想定した海水浸漬により、表面被覆材の有無による内部塩分の腐食におよぼす影響の把握とアクリルゴム系被覆材で塗装した場合の内部塩分の許容量を検討した。その結果、塩水噴霧試験では、内部塩分量が 0.6% (JASS 5 の許容塩分量の 14 倍) を超えない場合は、鉄筋腐食

を生じなかった。海水浸漬試験(8年間)では、許容塩分量は0.8%であった(図2)。内部塩分を含まない場合は、表面被覆によって鉄筋腐食を完全に防止できるが、多量に含む場合にはその腐食防止効果は完全ではない。しかし、表面被覆により、その塩分許容量は被覆していないものより約5倍大きくなる。

供試体		試験 *) 内部塩分量 (%) かぶり厚さ (mm)		海水浸漬試験：8年							
				0		0.2		0.8		1.0	
				20	30	20	30	20	30	20	30
非塗装供試体	外観	空中部									
	腐食面積率 (%)	主筋 16φ									
アクリルゴム系被覆供試体	外観	空中部									
	腐食面積率 (%)	主筋 16φ									

図1 鉄筋の腐食状況（腐食面積率） 海水浸漬8年

*)内部塩分量：モルタル成分に対する NaCl の質量%

第5章では、塩害防止用としてアクリルゴム系被覆材の Cl⁻イオン等の腐食因子に対する拡散抵抗性、コンクリートのひび割れ追従性に関係する力学的特性および紫外線、熱、オゾンに対する耐久性を検討した。その結果、被覆材が遮塩性を発揮するには 1mm 程度の膜厚が必要であり、被覆材の各腐食因子に対する遮断機能を、拡散係数からコンクリート厚さに換算した(表 2)。ゴム弾性論から塗膜の力学的特性とひび割れ追従性とを関連づけた。塗膜の耐久性に関し、熱劣化はアレニウス式による劣化予測、オゾン劣化および紫外線劣化は化学結合エネルギーからの劣化予測により、ポリマーの化学的組成と塩害防止機能とを関連づけた。

表 2 塗膜の鉄筋腐食要因に対する遮断特性

	透水量 (ml)	空気透過性 (cc/m・hr・mmHg)	塩化物イオンの 拡散係数 (cm ² /sec)	水蒸気透過性 (g/m ² ・日)
アクリルゴム系 a)	0.0	2.8×10^{-4}	1.4×10^{-11}	12.5
b)	0.1	4.3×10^{-4}	5.3×10^{-11}	—
コンクリート板 *) a)	72	1.4	6.0×10^{-8}	50.4 **)
コンクリート相当厚み ***))	720mm	5000mm	4300mm	40mm

a) : 初期状態 (伸長なし)

b) : 100%伸長状態での透過性

第6章では、実物大の柱、梁、スラブ屋根から構成される鉄筋コンクリート構造物(図2)を、多量の飛来塩分環境下で、かつ高温・多湿の亜熱帯気象条件下にある沖縄の海岸に建設した。実験は、鉄筋コンクリートに内部塩分を含む場合と含まない場合について、鉄筋腐食に基づく耐用年数と表面被覆材による腐食抑制効果の定量的評価を試みた。その結果、梁部の塩化物イオン量分布(図3)が示すように、厚さ40mmのかぶりコンクリートでは、Cl⁻イオンの浸透を抑制することができず、暴露約2年後に、鉄筋が腐食するCl⁻イオン量の限界値に達し、暴露開始後約4年でコンクリートに鉄筋腐食によるひび割れが生じた。

アクリルゴム系被覆材で塗装したコンクリート部は、沖縄県の厳しい塩分環境下で、10年間にわたって、腐食要因物質に対して高い拡散抵抗性と十分なひび割れ追従性を示した。内部塩分として、JASS 5の規定値の24倍のCl⁻イオン量を含む場合でも、塗膜部の腐食グレードは、無塗膜部の場合のそれに比べ2レベル低く、被覆材は鉄筋の腐食を抑制していることが判明した。

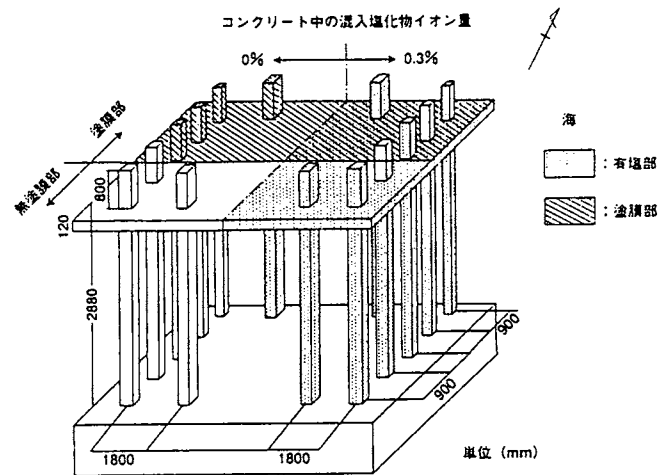


図2 構造物の寸法と要因

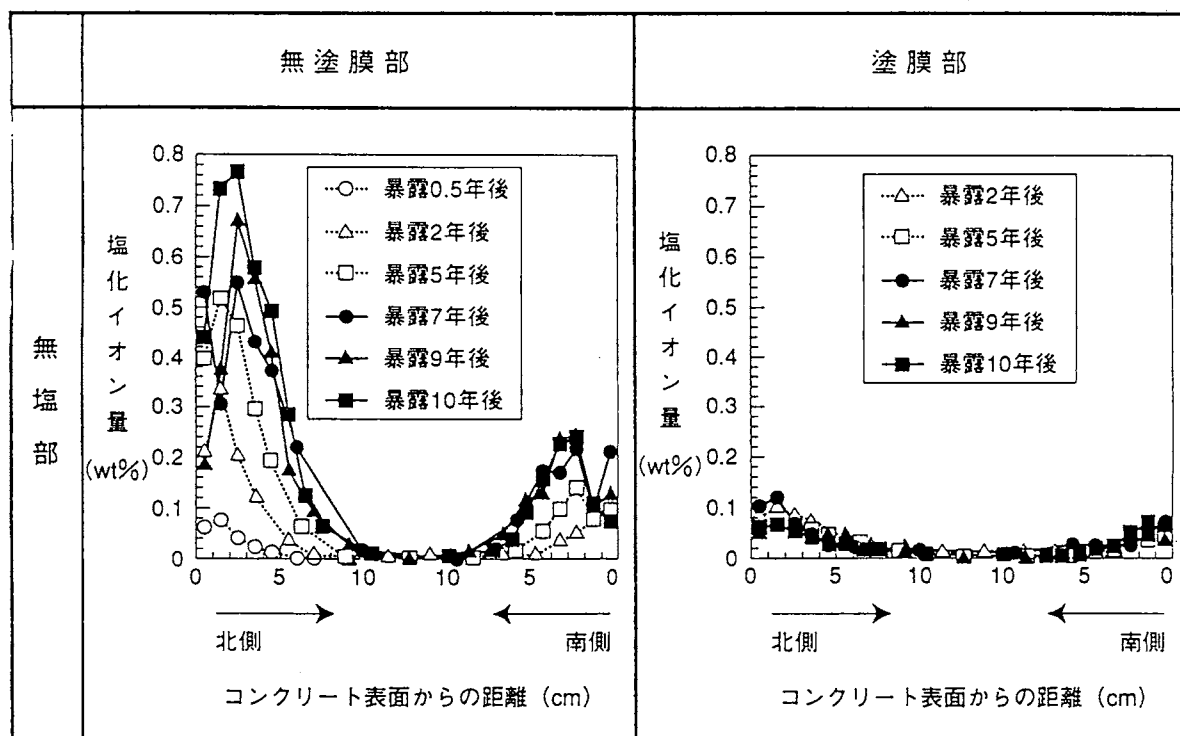


図 3 梁の塩化物イオン量分布

学位論文審査結果の要旨

本学位論文に関し、平成10年1月29日に第1回審査委員会を開き、面接審査を行った後、論文の内容について検討した。さらに、2月5日に行われた口頭発表の後に第2回審査委員会を開き協議の結果、以下のように判定した。

製造時に塩分が混入したコンクリートおよび塩分環境下にある鉄筋コンクリート構造物においては早期に鉄筋が腐食するので、その防止対策が重要な研究課題として取り上げられている。本論文は、まず海砂を使用して製造されたコンクリートを想定して、細孔溶液中の OH^- 、 Cl^- および NO_2^- イオンの挙動より亜硝酸塩の防錆効果のメカニズムについて検討し、亜硝酸カルシウムを混入したコンクリートでは、 Cl^- イオンの固定能が高くなることを明らかにしている。つぎに、塩化物イオンのコンクリート中への浸透過程の数値解析を行うとともに室内における促進試験条件と実際の海洋環境条件の対応関係を検討し、各促進試験によって得られた結果に対する新しい解釈の仕方を提起している。さらに、長期間にわたる耐久性を考慮にいて、塩化物イオンの侵入を遮断する性能という観点から見た高分子材料の設計に関して詳細な考察を加えている。その結果、高分子材料の化学組成と塩化物イオン遮断性能との関連づけに成功した。また、沖縄の海洋環境下にある鉄筋コンクリート構造物に対する暴露試験の結果より高分子被覆材の鉄筋防錆効果について貴重な知見を得ている。

以上の研究成果は、塩化物イオンの存在下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食防止法の確立において有益なものであり、博士論文として価値あるものと判定した。